

# Uderzenie hydrodynamiczne w próbie oceny możliwości analizy przyczyn uszkodzeń nawierzchni z betonu asfaltowego

## Hydrodynamic impact in an attempt to assess the possibility of analyzing the causes of damage to asphalt concrete pavement



**Witold Paleczek**

Dr inż.

Politechnika Częstochowska,  
Wydział Budownictwa

ORCID: 0000-0003-4742-2078  
witold.paleczek@pcz.pl

**Streszczenie:** Przedstawiono zjawisko uderzenia hydrodynamicznego do próby oceny możliwości zaliczenia go do głównych przyczyn prowadzących do powstawania uszkodzeń nawierzchni z betonu asfaltowego. Zjawisko to występuje niezależnie od pory roku. Uszkodzenia nawierzchni spowodowane zamarzaniem roztworów wodnych w szczelinach pęknięć siatkowych i liniowych są powszechnie znane i zaliczane, podobnie do wysadzin, do głównych przyczyn uszkodzeń nawierzchni. Uzasadniono, że uderzenie hydrodynamiczne powodowane kołami przedniej i tylnej osi pojazdu o sprężystym ogumieniu, powoduje powstawanie zjawisk falowych, które prowadzić mogą do przekroczenia wytrzymałości materiału konstrukcji nawierzchni. Przekroczenie dopuszczalnych naprężeń w zakresie częstotliwości formantowych może prowadzić do utraty spójności i w konsekwencji utraty nośności tego materiału.

**Słowa kluczowe:** Uderzenie hydrodynamiczne; Uszkodzenia nawierzchni drogowych; Analiza FFT; Wytyżenie materiału

**Abstract:** The phenomenon of hydrodynamic impact was presented as an attempt to assess the possibility of including this phenomenon as one of the main caused leading to the formation of damage to the asphalt concrete pavement. This phenomenon occurs regardless of the season. Pavement damage caused by the freezing of water solutions in the mesh cracks and line cracks is widely known and, as well as swelling ice in clay soil, are among the main caused of pavement damage. It was justified that the hydrodynamic impact caused by the wheels of the front a then the rear axle of the vehicle with elastic tires causes the formation of wave phenomena that may lead to exceeding the material effort. Exceeding the permissible stresses in the formant range of the resonant frequency may lead to the loss of cohesion and load capacity of this material.

**Keywords:** Hydrodynamic impact; Damage to road surfaces; FFT analysis; Material effort

### Wprowadzenie

Uszkodzenia nawierzchni drogowej powodowane są czynnikami, z których jako ważniejsze wymieniane są:

- obciążenie ruchem pojazdów: skutki obciążeń cyklicznych, miejscowe przeciążenia nawierzchni, ścieranie, koleinowanie, łamanie warstwy ścieralnej prowadzącej do tworzenia się pęknięć podłużnych, siatkowych i w reszcie do powstawania wybojów, przełomów drogowych, [1 ÷ 4];
- zmiany hydrologiczne: skutki erozji spowodowanej wpływem wód i niewłaściwym odprowadzeniem

wody z podbudowy wskutek tworzenia się zastoisk, a w czasie mrozów tworzenie się wysadzin w warstwach pod nawierzchnią;

- zmiany termiczne: skutki miejscowego tworzenia się gradientu termicznego, skutki krzepnięcia roztworów wodnych w ubytkach nawierzchni drogowej poprzez działanie temperatury poniżej punktu krzepnięcia;
- deformacje podłoża: wskutek wyługowania materiału spod podbudowy, wskutek osuwisk, wskutek deformacji górotworu na obszarach zaliczanych do terenów górniczych;

- erozja chemiczna: skutki krystalizacji soli z roztworów wodnych w pęknięciach, [5 ÷ 12].

Analiza lokalizacji uszkodzeń nawierzchni drogowych wykonanych nie tylko z betonu asfaltowego wskazuje, że miejsca, w których tworzą się zastoiska wody, po której następnie poruszają się pojazdy, szybciej ulegają uszkodzeniom mechanicznym. Uszkodzenia takie uzasadniane są wpływem niskich temperatur poniżej punktu krzepnięcia roztworu. Znana jest powszechnie zależność zwiększania objętości cieczy przy jej zamarzaniu, które prowadzi do wzrostu naprężeń



1. Pęknięcia siatkowe i blokowe oraz ubytki – przykład uszkodzenia nawierzchni asfaltowej wskutek braku prawidłowego odprowadzenia wody opadowej, a następnie działania mrozu



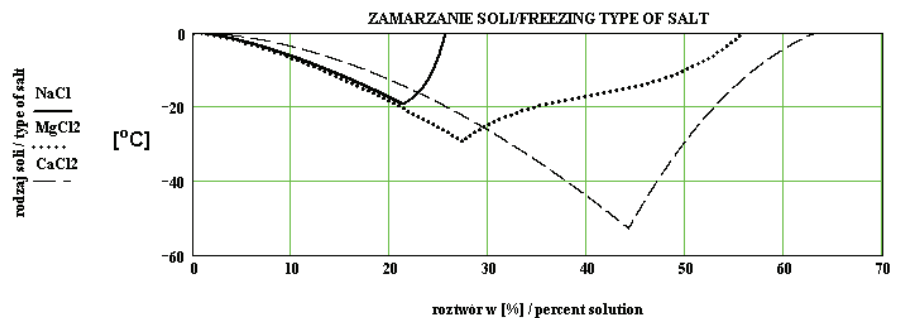
2. Pęknięcia siatkowe, blokowe i liniowe – uszkodzenie nawierzchni asfaltowej polegające na jej spękaniu wskutek wytworzenia się wysadzin pod nawierzchnią; widoczne wykroplenie roztworu z lodu zalegającego w podbudowie; roztwór z rozpuszczonego lodu zalegającego w podbudowie wydostaje się na górną powierzchnię nagrzanej od promieniowania słonecznego nawierzchni pod wpływem grawitacji i obciążenia zewnętrznego



3. Wyboje/ubytki/dziury – przykłady rozległych, powierzchniowych uszkodzeń warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego: warstwa ścieralna oddzielona tkaniną od warstwy wiążącej: a) uszkodzenie wgłębne w kształcie eliptyczno-kołowym ze znaczną ilością roztworu, b) uszkodzenie wgłębne w kształcie kołowym z roztworem w warstwie wiążącej, c) uszkodzenie wgłębne nawierzchni w kształcie eliptyczno-podłużnym z widocznym fragmentem soczewki lodowej (z lewej) – uwidoczniona erozja wgłębna warstwy wiążącej pod uszkodzoną warstwą tekstylną



4. Wyboje: a) Fragment nawierzchni drogowej ze znacznymi ubytkami w warstwie ścieralnej z betonu asfaltowego, jak również w warstwie wiążącej i w podbudowie; b) koło pojazdu zagłębione we wgłębny ubytek wierzchniej warstwy drogowej sięgającej do podbudowy, z widocznymi zastoinami roztworu

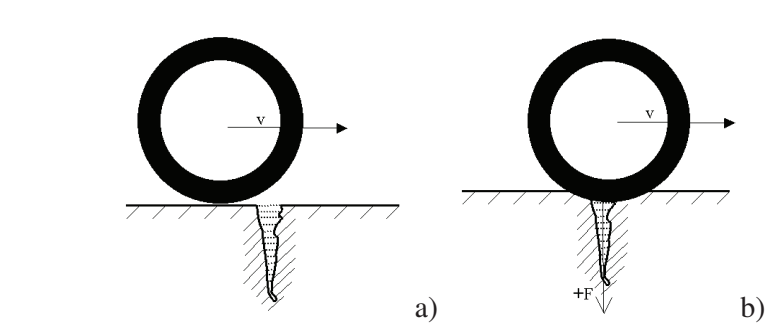


5. Wykresy zamarzania wodnych roztworów w [%] soli NaCl – oznaczenie linią ciągłą; MgCl2 – oznaczenie linią kropkowaną; CaCl2 – oznaczenie linią przerywaną. Obszar „wewnątrz krzywej wykresu” to „roztwór”, obszar po prawej stronie od punktu ekstremum to „roztwór i sól”, obszar poniżej temperatury ekstremalnej to „lód i sól obok siebie”, obszar od „0” do punktu ekstremum to „lód i roztwór”

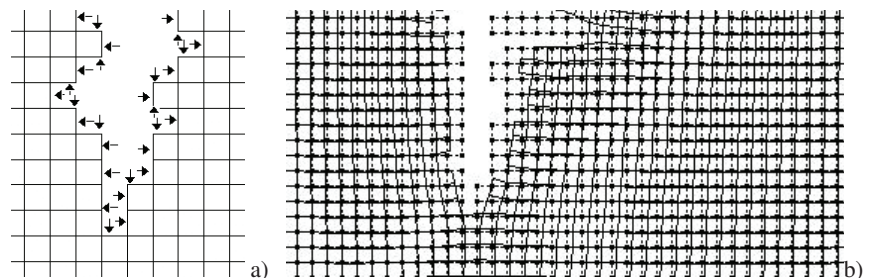
rozciągających i w efekcie do lokalnej utraty spójności materiału, do wytworzenia się ubytku w nawierzchni. Na rysunku 1 przedstawiono uszkodzenie nawierzchni asfaltowej wskutek niewłaściwego odprowadzenia wody opadowej, natomiast na rysunku 2 wykroplenie porą zimową „wody” ze szczelin spękanej nawierzchni asfaltowej, pod którą wytworzyły się wysadziny. Na rysunku 3 przedstawiono wyboje i ubytki nawierzchni asfaltowej z widocznymi zastóskami „wody”, przy czym uwidoczniono także destrukcyjny mechanizm gromadzenia roztworu wodnego przez geowłókninę (zarejestrowane uszkodzenia powstały porą zimową). Na rysunku 4 przedstawiono uszkodzony fragment nawierzchni pasa drogi z betonu asfaltowego z widocznymi zastóskami roztworu wodnego zalegającymi w ubytkach nawierzchni, które sięgają do podbudowy.

## Roztwory wodne w okresie zimowym

W okresie zimowym nawierzchnie drogowe posypywane są mieszankami soli, które mają za zadanie obniżyć temperaturę krzepnięcia roztworu wody. Stosowane są różne sole i ich mieszaniny, [6, 11÷15]. Wykonane analizy krzepnięcia niektórych solnych roztworów wodnych umożliwiły utworzyć proponowane wzory empiryczne, które mogą okazać się przydatne w oszacowaniu temperatury [°C], przy której następuje krzepnięcie roztworu w zależności od procentowej zawartości danej soli, której ilość podana jest w [%], [16]. W przypadku NaCl uzyskano zależność określoną wzorem (1), w przypadku MgCl<sub>2</sub> uzyskano formułę (2), w przypadku CaCl<sub>2</sub> uzyskano formułę (3). Prezentację otrzymanych zależności przedstawiono na wykresie zbiorczym, na rysunku 5: wizualizacja wzorów empirycznych (1) ÷ (3) pozwala zauważyć, że istnieją roztwory wodne, które przy mrozach sięgających temperatury rzędu minus 40 [°C] są jeszcze w stanie płynnym.



6. Ilustracja przedstawiająca schemat pojedynczego uderzenia hydrodynamicznego, które może być przyczyną powstawania rozległych uszkodzeń mechanicznych spękanej nawierzchni drogowej: a) koło pojazdu jadącego z prędkością  $v$  przed szczeliną wypełnioną cieczą; b) najazd koła o sprężystym ogumieniu na szczelinie wypełnionej cieczą – ciśnienie sprężonej cieczy wywołuje naprężenia działające jak przy uderzeniu hydrodynamicznym



7. a) Schemat równomiernego rozkładu sił działających na ścianki ubytku przy ustalonym ciśnieniu cieczy (fragment siatki modelu MES); b) wynik obliczeń deformacji modelu MES – przykładowa deformacja materiału izotropowego przy zadanym schemacie obciążenia

$${}_{NaCl}t(p) = \begin{cases} -0,222 \cdot p^{1,46} & \text{dla } 0 < p < 21,2\% \\ (0,0001 \cdot e^{0,48 \cdot p}) - 22 & \text{dla } p \geq 21,2\% \end{cases} \quad (1)$$

$${}_{MgCl_2}t(p) = \begin{cases} -0,25 \cdot p^{1,44} & \text{dla } 0 < p < 27,2\% \\ (0,0027 \cdot p^3 - 0,328 \cdot p^2 + 13,75 \cdot p - 215) & \text{dla } p \geq 27,2\% \end{cases} \quad (2)$$

$${}_{CaCl_2}t(p) = \begin{cases} -0,06 \cdot p^{1,79} & \text{dla } 0 < p < 44,2\% \\ (0,25637 \cdot p \cdot e^{4,5-0,014 \cdot p}) - 602 & \text{dla } p \geq 44,2\% \end{cases} \quad (3)$$

## Uderzenie hydrauliczne a uderzenie hydrodynamiczne

W literaturze rozróżniane są zasadniczo dwa znamienne oddziaływania dynamiczne płynów na otaczającą je strukturę. Jednym jest zjawisko nazywane uderzeniem hydraulicznym, które występuje w rurociągach i polega na nagłym zatrzymaniu strumienia płynu, który przemieszcza się w instalacji ze znaczną prędkością – zjawisko to nie jest tematem niniejszego opracowania. W odróżnieniu, uderzenie hydrodynamiczne polega na znacznym sprężeniu płynu w zadanej obję-

tości i na rozprężeniu powodującym obciążenie udarowe otaczającej struktury masą płynu (np. wysokie ciśnienie płynów stosowane w obórce skrawaniem), [17 ÷ 22].

W przypadku ubytku występującego w nawierzchni drogowej, w którym znajduje się ciecz, sprężyste ogumienie koła najeżdżając na ubytek doprowadza do sprężenia cieczy, przez analogię do zjawiska „sprężania tłokiem w cylindrze” – na rysunku 6 przedstawiono najprostszy schemat obciążenia od pojedynczego koła, przyjęty w dalszych, uproszczonych obliczeniach modelowych.

## Obliczenia modelowe MES

Wykorzystując możliwości modelowania MES przeprowadzono analizę deformacji materiału izotropowego poddanego obciążeniom, które mogłyby wykazywać analogię do obciążenia szczeliny zamarzającym roztworem wodnym, [23 ÷ 25]. Ciśnienie cieczy zamodelowano obciążeniem ciągłym przyłożonym do powierzchni i węzłów siatki od strony wewnętrznej zamo-

delowanego ubytku. Przyjęty model może ilustrować przybliżoną analogię do zjawiska zwiększania się ciśnienia wskutek krzepnięcia roztworu. Na rysunku 7 przedstawiono wycinek siatki z modelu MES uzupełniony o schemat obciążenia – rys. 7a), natomiast rys. 7b) ilustruje wynik teoretycznej deformacji ciągłej przyjętego modelu pod wpływem zadanego schematu obciążenia.

W kolejnym modelu MES wykonano analizę wyężenia materiału w stanie ustalonym. Założono, że usytuowanie elementów w modelu będzie ilustracją ubytków w materiale. Założono, że ścianki „ubytku” usytuowanego po lewej stronie w modelu są obciążone liniowo, w drugim „ubytku” ścianki są nieobciążone. Przyjęto, że wyężenie materiału (materiał izotropowy, wyężeniowo niesymetryczny) określone jest uogólnioną hipotezą Mohra, którą w płaskim stanie naprężeń wyraża zależność (4):

$$\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + 2 \cdot \sigma_{12}^2 - 2 \cdot \nu \cdot (\sigma_{11} \cdot \sigma_{22} - \sigma_{12}^2) - (\bar{\sigma} + \underline{\sigma}) \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \bar{\sigma} \cdot \underline{\sigma} = \Xi \quad (4)$$

w której:

$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$  – odpowiednio naprężenia normalne i tnące,  $\nu$  – liczba Poissona,  $\bar{\sigma}, \underline{\sigma}$  – odpowiednio dopuszczalne naprężenia na ściskanie i rozciąganie,  $\Xi$  – wyężenie materiału według zadanej hipotezy wyężeniowej, [26 ÷ 28].

W miejscach, w których wystąpi największe wyężenie można oczekiwać uszkodzenia materiału polegającego na utracie jego ciągłości.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki obliczeń – fragmenty zdeformowanej siatki modularnej oraz mapy wyężeniowej z modelu MES. Na mapie wyężeniowej (rys. 8b) odcieniem jaśniejszym zaznaczono miejsca największego wyężenia. Z wyników obliczeń można wnioskować, że „ubytek” wypełniony cieczą pod ciśnieniem może ulec pogłębieniu oraz że fragment materiału oddzielający „ubytki” może ulec odspojeniu.

## Uproszczony model obliczeniowy uderzenia opony w szczelinę wypełnioną cieczą

Przyjęto do rozważań model „uderzenia hydrodynamicznego” określony macierzowym równaniem różniczkowym drugiego rzędu postaci, [21, 22, 25, 28, 31]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) \quad (5)$$

w którym:

**m** - macierz bezwładności,  
**u** - macierz przemieszczeń węzłowych (współrzędnych uogólnionych),  
**c** - macierz tłumienia,  
**k** - macierz sztywności,  
**F(t)** - macierz funkcji wymuszeń dynamicznych w czasie (macierz obciążeń).

W modelu numerycznym przyjęto analogię do modelu nawierzchni wielowarstwowej o zadanych wartościach zawartych w macierzach bezwładności, sztywności i tłumienia. W teście obliczeniowym założono, że analizą objętych jest jednocześnie siedem warstw: warstwa pierwsza w modelu, oznaczona na wykresach zmienną „w7”, wzbudzana jest impulsami udarowymi oddalonymi od siebie w czasie o wartość wynikającą ze wzoru (6). Wzór ten ujmuje dwa impulsy, więc założono tu analogię do pojazdu dwuosiowego (funkcja  $F(t)$ ). W przypadku pojazdu pięciosiowego impulsy udarowe określono jak we wzorze (7) – (funkcja  $FC(t)$ ):

$$F(t) = a_0 \cdot e^{-b_0 \cdot (t-t_0)^2} + a_1 \cdot e^{-b_1 \cdot (t-(t_0+t_{12}))^2} \quad (6)$$

$$FC(t) = c_0 \cdot e^{-d_0 \cdot (t-t_0)^2} + c_1 \cdot e^{-d_1 \cdot (t-(t_0+tc_{12}))^2} + c_2 \cdot e^{-d_2 \cdot (t-(t_0+tc_{12}+tc_{23}))^2} + c_3 \cdot e^{-d_3 \cdot (t-(t_0+tc_{12}+tc_{23}+tc_{34}))^2} + c_4 \cdot e^{-d_4 \cdot (t-(t_0+tc_{12}+tc_{23}+tc_{34}+tc_{45}))^2}$$

(7), przy oznaczeniach:

$$a = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 13 \cdot 10^3 \\ 13 \cdot 10^3 \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \\ 4 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}, t_0 = 0.1 \text{ [s]}$$

$$t_{12} = \frac{2.7 \text{ [m]}}{v \left[ \frac{m}{s} \right]}, tc_{12} = \frac{3.7 \text{ [m]}}{v \left[ \frac{m}{s} \right]}, tc_{23} = \frac{7.16 \text{ [m]}}{v \left[ \frac{m}{s} \right]}, tc_{34} = \frac{1.21 \text{ [m]}}{v \left[ \frac{m}{s} \right]}, tc_{45} = \frac{1.21 \text{ [m]}}{v \left[ \frac{m}{s} \right]}$$

w których:

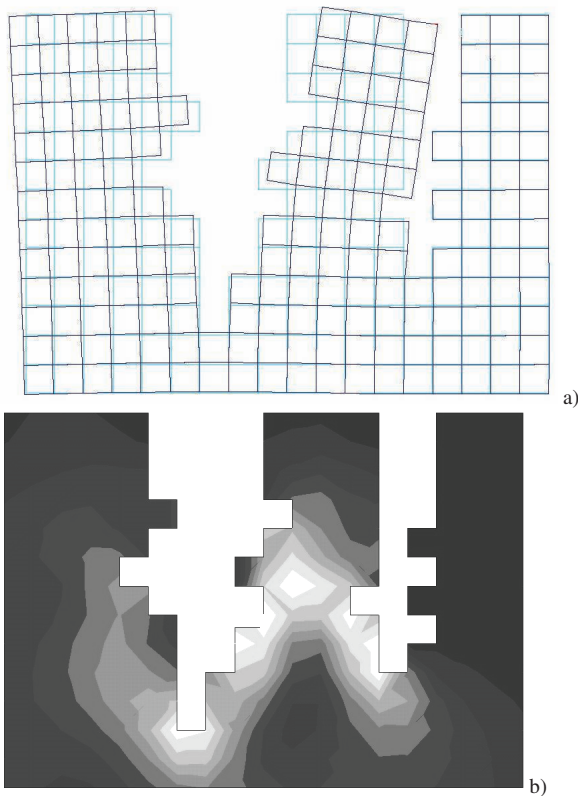
$a, b, c, d$  – wartości empiryczne modelujące wymuszenie udarowe w dziedzinie czasu,

$t_0$  – odległość na osi czasu pierwszego impulsu wzbudzenia udarowego od początku układu współrzędnych: przyjęto wartość stałą we wszystkich testach obliczeniowych ;

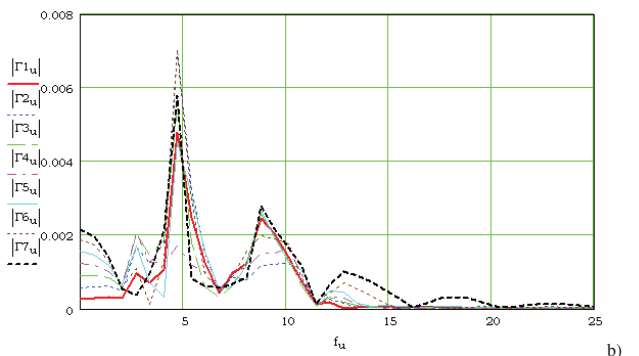
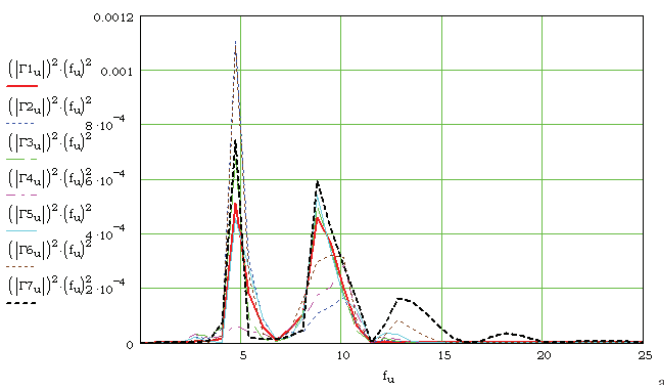
$t_{12}$  – czas potrzebny na przebycie drogi równej odległości oddalenia od siebie osi pojazdu dwuosiowego, przy zadanej prędkości przejazdu ;

$tc_{12}, tc_{23}, tc_{34}, tc_{45}$  – nazwy zmiennych określające czas potrzebny na przebycie drogi równej odległościom sąsiadujących ze sobą osi pojazdu pięciosiowego przy zadanej prędkości .

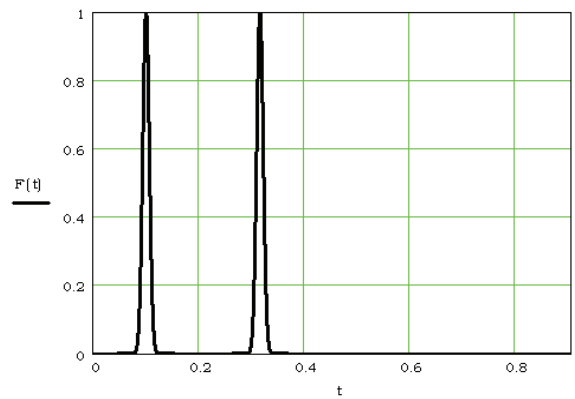
W obliczeniach przyjęto, że każdy impuls wymuszenia udarowego modelowany jest krzywą zbliżoną kształtem do rozkładu normalnego. Zakres prędkości przejazdu analizowano w przedziale od 15 [km/h] do 100 [km/h]. Rozwiązania równania (5) przy zadanych funkcjach wymuszeń udarowych określonych wzorami (6) i (7) uzyskano metodą Rungego-Kutty, przy zastosowaniu algorytmu generującego rozwiązanie w równych krokach podziału przedziału całkowania – algorytm ten umożliwił bezpośrednie przeprowadzenie dalszych obliczeń przy zastosowaniu FFT bez konieczności przeprowadzenia dodatkowego kwantowania danych, [25]. Na rysunku (9) przedstawiono przykład funkcji wymuszającej (w dziedzinie czasu), natomiast na rysunku (10) przedstawiono wykres zbiorczy rozwiązania równania



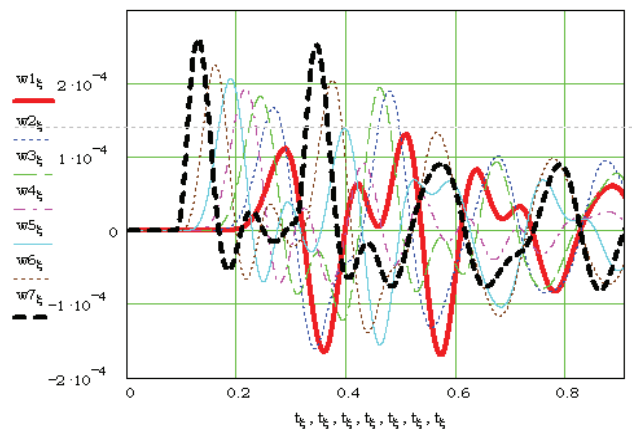
8. Model MES wyężenia materiału w płaskim stanie naprężen przy zadanej geometrii i stałych materiałowych materiału izotropowego: a) większy powierzchniowo obszar ubytku w analizowanym przekroju pionowym odpowiada „szczelinie wypełnionej cieczą pod ciśnieniem”, natomiast mniejszy obszar ubytku odpowiada sąsiadującej „szczelinie pustej”, nieobciążonej; b) mapa izol linii wyężenia materiału izotropowego: odcieniem jaśniejszym zaznaczono wyężenie materiału, przy którym może nastąpić utrata ciągłości



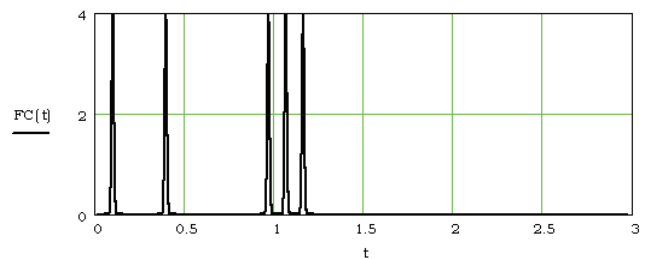
11. a) Wykres zależności amplitudy formantów głównych w funkcji częstotliwości, częstotliwość w [Hz]. Oznaczenia: linia pogrubiona przerywana dotyczy warstwy zewnętrznej (w7); linia ciągła pogrubiona dotyczy warstwy wewnętrznej, skrajnej (w1); pozostałe linie odnoszą się do warstw pośrednich między (w7) a (w1); przykład dotyczy pojazdu dwuosowego o rozpiętości osi 2,7 [m], jadącego z prędkością 45 [km/h]; b) widmo FFT – wzór (8)



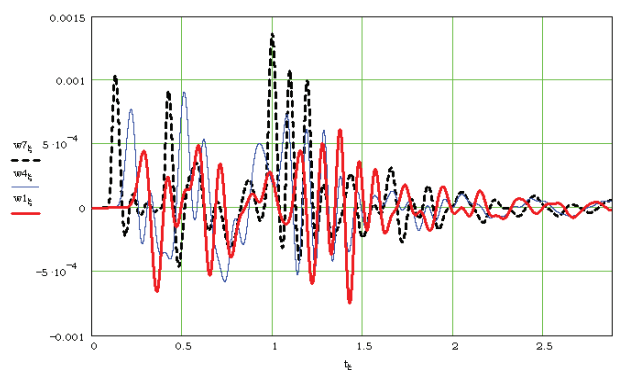
9. Wykres impulsów wzbudzenia układu warstw w modelu w czasie [s] przez pojazd dwuosowy; tu: rozstaw osi 2,7 [m], przejazd z prędkością 45 [km/h]



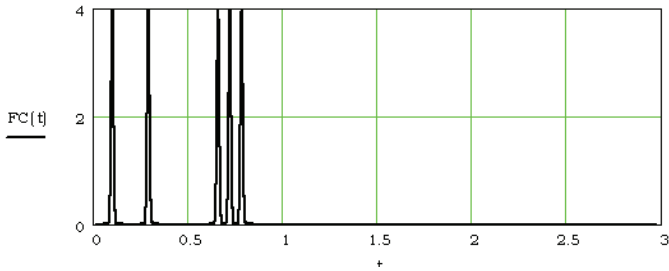
10. Wykres zbiorczy przemieszczeń pionowych siedmiu warstw modelu nawierzchni analizowanego w tym przedziale czasu. Wzbudzenie (obciążenie) przez przejazd pojazdu dwuosowego o rozstawie osi 2,7 [m] z prędkością 45 [km/h]. Oznaczenia: (w7) warstwa zewnętrzna (pierwsza) oznaczona linią przerywaną pogrubioną, (w1) warstwa skrajna (wewnętrzna) w modelu oznaczona linią ciągłą pogrubioną, (w2, w3, w4, w5, w6) warstwy pośrednie, usytuowane między (w7) i (w1)



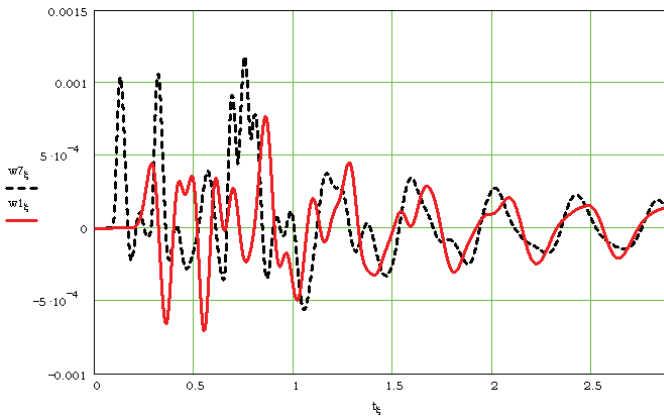
12. Wykres wzbudzenia udarowego układu warstw w dziedzinie czasu, [s]; pojazd pięciosiowy; tu: rozstaw osi (ciągnik siodłowy dwuosowy) 3,7 [m] + (naczepa trzyosiowa) +7,16 [m] + 1,21 [m] + 1,21 [m]; przejazd z prędkością 45 [km/h]



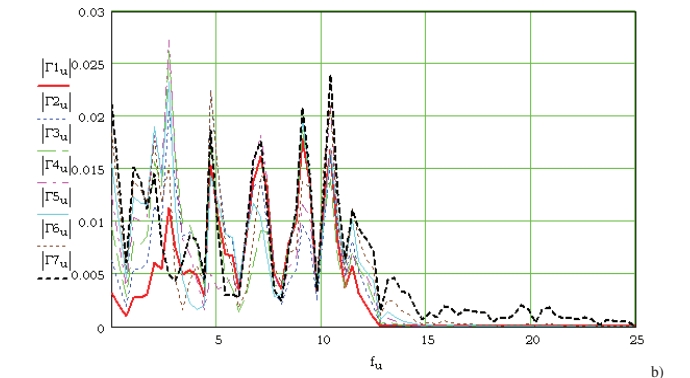
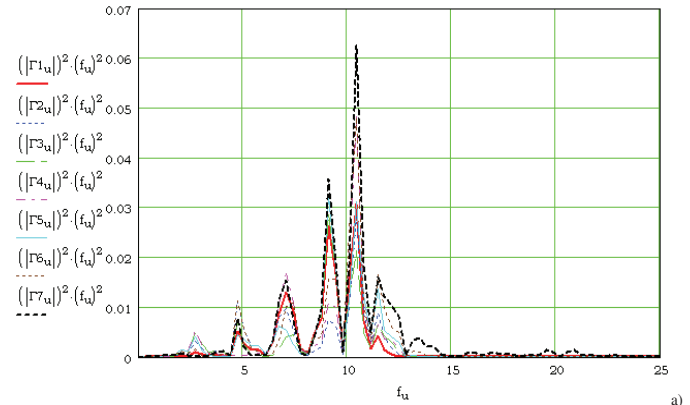
13. Wykres zbiorczy przemieszczeń warstw w dziedzinie czasu [s] przy wzbudzeniu dynamicznym, którego ilustrację zamieszczono na rysunku 12. Oznaczenia: (w7) – warstwa pierwsza – linia przerywana, pogrubiona; (w4) – warstwa pośrednia – linia ciągła, cienka; (w1) – warstwa ostatnia w modelu – linia ciągła, pogrubiona; pojazd pięciosiowy, ruch z prędkością 45 [km/h]



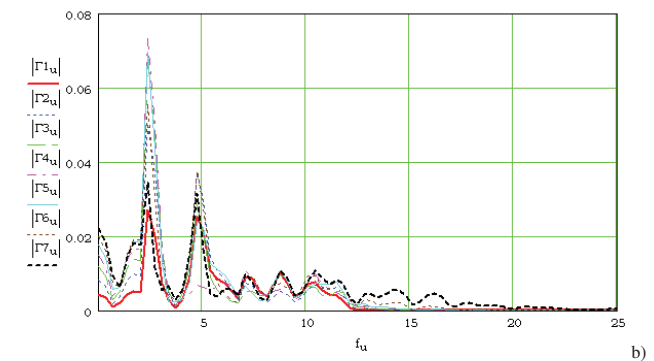
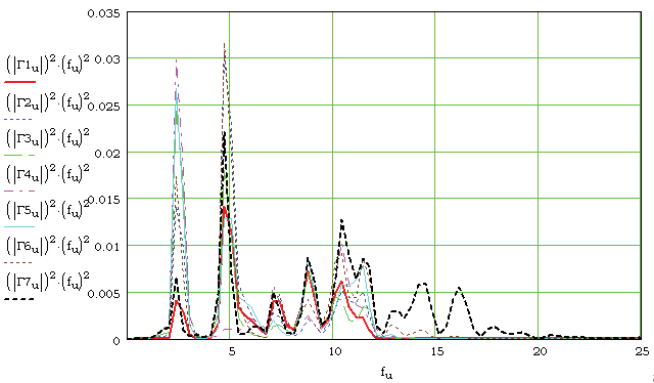
15. Wykres wzbudzenia uderowego układu warstw w dziedzinie czasu, [s]; pojazd pięcioosiowy;  $t_u$ : rozstaw osi (ciągnik siodłowy dwuosiowy) 3,7 [m] + (naczepa trzyosiowa) + 7,16 [m] + 1,21 [m] + 1,21 [m]; przejazd z prędkością 70 [km/h]



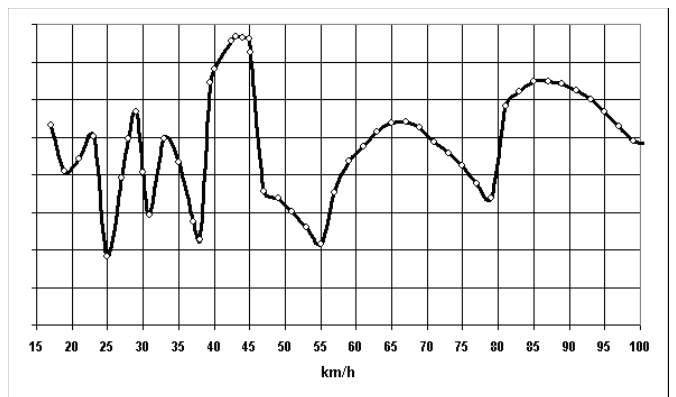
16. Wykres zbiorczy przemieszczeń warstw w dziedzinie czasu [s] przy wzbudzeniu dynamicznym, którego ilustrację zamieszczono na rysunku 15. Oznaczenia: (w7) – warstwa pierwsza – linia przerywana, pogrubiona; (w1) – warstwa ostatnia w modelu – linia ciągła, pogrubiona



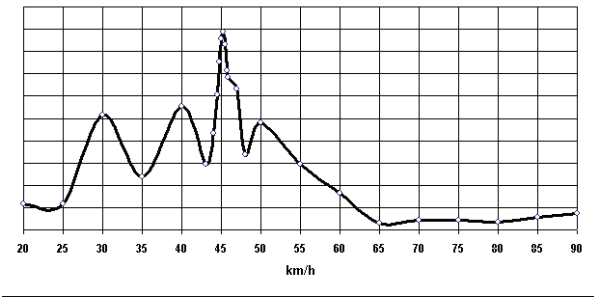
14. a) Zbiorcze zestawienie formantów głównych wzbudzenia warstw modelu uzyskanych z analizy widmowej w dziedzinie częstotliwości [Hz]. Ilustracja wymuszeń uderowych zamieszczona na rysunku 12; pojazd pięcioosiowy, przejazd z prędkością 45 [km/h]. Oznaczenia: ( $\Gamma 7$ ) – warstwa pierwsza w modelu – linia przerywana, pogrubiona; ( $\Gamma 6$ ) do ( $\Gamma 2$ ) – warstwy pośrednie – prezentacja liniami cienkimi; ( $\Gamma 1$ ) – warstwa ostatnia – linia ciągła, pogrubiona; b) widmo FFT – formuła (8)



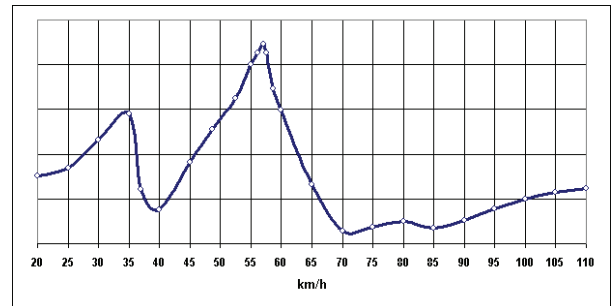
17. a) Zbiorcze zestawienie formantów głównych wzbudzenia warstw modelu uzyskanych z analizy widmowej w dziedzinie częstotliwości [Hz]. Ilustracja wymuszeń uderowych zamieszczona na rysunku 15; pojazd pięcioosiowy, przejazd z prędkością 70 [km/h]. Oznaczenia: ( $\Gamma 7$ ) – warstwa pierwsza w modelu – linia przerywana, pogrubiona; ( $\Gamma 6$ ) do ( $\Gamma 2$ ) – warstwy pośrednie – prezentacja liniami cienkimi; ( $\Gamma 1$ ) – warstwa ostatnia – linia ciągła, pogrubiona; b) widmo FFT – formuła (8)



18. Wykres zależności formantów głównych z zakresu analizowanych częstotliwości widmowych o maksymalnej wartości amplitudy: zależność od prędkości przejazdu pojazdu dwuosiowego (wartości formantów uśrednione z warstwy zewnętrznej, środkowej i skrajnej wewnętrznej modelu nawierzchni) – istnieje zakres prędkości przejazdu, przy którym przekazywane obciążenie do nawierzchni i podłoża ma największą energię;  $t_u$ : przedział prędkości o wartości od 39 do 45 [km/h]



19. Wykres zależności formantów głównych z zakresu analizowanych częstotliwości widmowych o maksymalnej wartości amplitudy: zależność od prędkości przejazdu pojazdu pięcioosiowego (wartości formantów uśrednione z warstwy zewnętrznej, środkowej i skrajnej wewnętrznej modelu nawierzchni) – istnieje zakres prędkości przejazdu, przy którym przekazywane obciążenie do nawierzchni i podłoża ma największą energię; tu: przedział prędkości o wartości od 44 do 46 [km/h]



20. Wykres zależności formantów głównych z zakresu analizowanych częstotliwości widmowych o maksymalnej wartości amplitudy: zależność od prędkości przejazdu pojazdu pięcioosiowego (wartości formantów uśrednione z warstwy zewnętrznej, środkowej i skrajnej wewnętrznej modelu nawierzchni) – istnieje zakres prędkości przejazdu, przy którym przekazywane obciążenie do nawierzchni i podłoża ma największą energię; tu: przedział prędkości o wartości od 53 do 60 [km/h]; sprężystość i tłumienie w modelu wielowarstwowym zwiększono o 1/5

(5). Ponieważ analiza postawionego zadania wymaga zastosowania wnioskowania na etapie obliczeń w dziedzinie częstotliwości, to wykorzystano do tego celu algorytm szybkiej transformacji Fouriera określonej wzorem (8) – (nazwa zmiennej „w7” oznacza, że obliczenia dotyczą pierwszej analizowanej warstwy w przyjętym, siedmiowarstwowym modelu, natomiast „w1” warstwy ostatniej):

$$|u| = \sqrt{\text{Re}[FFT(w7_\xi)]^2 + \text{Im}[FFT(w7_\xi)]^2} \quad (8)$$

Wyniki uzyskane ze wzoru (8) umożliwiają wykonanie analizy w pasmach częstotliwości formantów głównych (analiza formantowa). W analizie tej amplituda widmowa określona jest wzorem (9), natomiast częstotliwość widmowa wzorem (10), [15, 16, 29 ÷ 31]:

$$A7_u = (\Gamma7_u)^2 \cdot (f_u)^2 \quad (9)$$

$$f_u = \frac{u \cdot \tau_2}{\tau_1} \quad (10)$$

przy oznaczeniach:

$u = \tau_1 - 1$  – zmienna indeksująca częstotliwość odniesioną do czasu zdyskretyzowanego,

$t = \tau_0, \frac{\tau_1 - \tau_0}{\tau_2} \dots \frac{\tau_1}{\tau_2}$  – czas zdyskretyzowany, dostosowany do FFT na zbiorze próbek, którego elementy zestawio-

$$\tau = \begin{pmatrix} 0 \\ 2^n \\ f_s \end{pmatrix}, f_s.$$

no w wektorze, przy częstotliwości próbkowania.

### Wyniki analizy wymuszeń dynamicznych w dziedzinach czasu i częstotliwości

W zadaniu wykonano obliczenia wykazujące analogię do wzbudzeń udarowych generowanych przez dwa modele pojazdów: dwu- i pięcioosiowego, które przemieszczają się jednokrotnie, pojedynczo, z zadaną prędkością, najeżdżając jednostronnie kołami osi na pojedynczą szczelinę w nawierzchni, która jest wypełniona cieczą. W modelu pojazdu dwuosowego przyjęto rozstaw osi 2,7 [m], co odpowiada przybliżonej wartości rozstawu osi w wielu modelach samochodów osobowych. W przypadku modelu pojazdu pięcioosiowego wybrano pojazd członowy, składający się z dwuosowego ciągnika siodłowego o rozstawie 3,7 [m] i trzyosiowej naczepy o rozstawie osi +7,16 [m] + 1,21 [m] + 1,21 [m], co daje łączny rozstaw osi skrajnych: 13,28 [m].

Założono, że otoczenie szczelony wypełnionej roztworem jest siedmiowarstwowe. Każda warstwa określona jest stałymi materiałowymi określonymi w równaniu (5). Wymuszenia udarowe w czasie są proporcjonalne do rozstawu osi pojazdów i ich prędkości testowych określonych we wzorach

(6) i (7). Na rysunku 9 przedstawiono wykres wymuszeń w dziedzinie czasu dla modelu pojazdu dwuosowego przy zadanej prędkości testowej 45 [km/h], natomiast na rysunkach 12 i 15 dla pięcioosiowego pojazdu członowego: w obliczeniach w dziedzinie czasu analizowano odległości impulsów wzbudzenia udarowego oraz wykresy przemieszczeń kolejnych warstw – patrz rys. 10, 13, 16. W dziedzinie częstotliwości analizowano wartości amplitudy i położenia poszczególnych formantów przy zadanej prędkości przejazdu (patrz rysunki 11, 14, 17) – wartości maksymalne amplitudy wykorzystano do utworzenia wykresów zależności formantów głównych z zakresu analizowanych częstotliwości widmowych o maksymalnej wartości amplitudy – patrz rysunki 18, 19, 20 z wyodrębnieniem, poza analizą formantową, odnośnych wykresów dotyczących tylko widma FFT określonego we wzorze (8).

### Wnioski

Analizę zjawiska uderzenia hydrodynamicznego uproszczono tu sprawdzając ją do rozwiązania równania (5) przy wymuszeniach udarowych określonych wzorami (6) i (7). Następnie na otrzymanych rozwiązaniach z równania różniczkowego w dziedzinie czasu wykonano analizę widmową FFT wraz z analizą częstotliwości występowania formantu głównego. Przeprowadzone obliczenia na wielowarstwowym

modelach numerycznych umożliwiły potwierdzić przypuszczenie, że istnieje przedział prędkości „niebezpiecznej” dla różnych stałych materiałowych określonych odpowiednio sprężystością i tłumieniem materiału nawierzchni, przy zadanym wzbudzeniu udarowym, przy której przekazywana jest największa energia z kół pojazdu (tu: częstotliwość występowania formantu głównego przy zadanej prędkości przejazdu). Można przypuszczać, że jeżeli formant główny pokrywa się z częstotliwością rezonansową materiału, to do jego uszkodzenia dochodzi wówczas w najkrótszym czasie. Uderzenie hydrodynamiczne może mieć znaczny wpływ na uszkodzenia nawierzchni z betonu asfaltowego, a wnioski z modeli deterministycznych należałoby uzupełnić i potwierdzić wnioskami wynikającymi z badań na obiektach rzeczywistych. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Ciesielski R., Maciąg E., Spektra odpowiedzi drgań wywołanych ruchem drogowym. Mechanika nr 12, Wydawnictwa Krakowskiego Oddziału PAN, Kraków 1986, s. 27-46
- [2] Szydło A., Wpływ poziomych obciążeń na stan naprężeń wybranych typowych konstrukcji nawierzchni drogowych. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce 1998, 361-368
- [3] Radziszewski P., Piłat P., Nawierzchnie asfaltowe. WKiŁ, Warszawa 2007
- [4] Sybilski D. (red.), Katalog przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych, GDDKiA, IBDiM, Warszawa 2013
- [5] Iwański M., Mazurek G., Wodoodporność betonu asfaltowego produkowanego w technologii cieplej = Water und frost resistance of asphalt concrete produced in the warm technology. 10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques, Wilno 2010, s.200-206
- [6] Jaskuła P., Judycki J., Wpływ starzenia i oddziaływania wody i mrozu na zmianę właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. VIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2002, s.221-233
- [7] Judycki J., Budowa i kalibracja modeli spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechaniczno-empirycznej metodzie AASHITO 2004. Drogi i Mosty, nr 4/2011, s. 31-53
- [8] Wyrwał J., Podstawy fizyczne procesu zamarzania wody w porowatych materiałach budowlanych. Politechnika Opolska, Komisja Inżynierii Budowlanej Oddział Polskiej Akademii Nauk w Katowicach, Roczniki Inżynierii Budowlanej, z. 6/2006
- [9] Kalabińska M., Gaweł I., Piłat J., Asfalty drogowe. WKiŁ, Warszawa 2001
- [10] Pobocha M., Wpływ wypełniacza mieszanego na odporność betonu asfaltowego na oddziaływanie wody i mrozu. Z.N. Budownictwo, PWN, z.113, 1799, Kraków 2008
- [11] Mazurek Grzegorz, Wpływ starzenia na właściwości betonu asfaltowego z asfaltu niskotemperaturowego. Z.N. Budownictwo, PWN, z.113, nr 1799, s.161-168, Kraków 2008
- [12] Pobocha M., Odporność na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego. Z.N. Politechniki Śląskiej, z.109, nr 1735, s.301-308, 2006
- [13] Pentlakowa Z., WojnoT., Własności techniczne skał. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1956
- [14] Partyka J., Fizyczne podstawy procesu krzepnięcia wody w wilgotnych budowlanych materiałach porowatych. Przegląd Budowlany 9/2014, s.46-50
- [15] Paleczek W., Analiza doświadczalna i numeryczna uszkodzeń elementów konstrukcyjnych spowodowanych siłami statycznymi i dynamicznymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 160, 12, Częstochowa 2005
- [16] Paleczek W., Metody analizy danych (na przykładach). Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004
- [17] Wolschin G., Hydrodynamik. Universität Heidelberg, Institut für Theoretische Physik, Heidelberg 2015
- [18] Landau L., Lifszyc E., Hydrodynamika. PWN, Warszawa 1994
- [19] Średniawa B., Hydrodynamika i teoria sprężystości. PWN, Warszawa 1977
- [20] Trębacki K., Królicka A., Rozkład ciśnień hydrodynamicznych na ściankach drgających zbiorników, Bezpieczeństwo i Ekologia, 6, 2017, s.445-450
- [21] Gryboś R., Mechanika płynów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1991
- [22] Gryboś R., Drgania konstrukcji wzbudzone przepływem. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005
- [23] Grajek K., ABC Płyta.Tarcza.Rama. Pro-Soft, Gliwice 2000
- [24] Zienkiewicz O.C., Metoda elementów skończonych. Arkady, Warszawa 1972
- [25] Paleczek W., Mathcad w algorytmach. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005
- [26] Marks W., Optymalizacja według kryteriów wytrzymałościowych. Kryteria i metody optymalizacji konstrukcji. IPPT PAN, PWN, Warszawa 1977
- [27] Paleczek W., Prognozowanie miejsca pęknięcia płyty betonowej przy wykorzystaniu numerycznej mapy wyężenia. Drogownictwo 2004, 5, 155-159
- [28] Skalmierski B., Mechanika analityczna i teoria drgań. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001
- [29] Ciesielski R., Maciąg E., Drgania drogowe i ich wpływ na budynki. WKiŁ, Warszawa 1990
- [30] Ciesielski R., Ocena szkodliwości wpływów dynamicznych w budownictwie. Arkady, Warszawa 1973
- [31] Kucharski T., System pomiaru drgań mechanicznych. WNT, Warszawa 2002